

PERENCANAAN PELEPASAN BEBAN DENGAN ANALISIS *EIGENVALUE* DAN *EIGENVECTOR*

Ardiaty Arief
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
ardiaty@eng.unhas.ac.id

Muhammad Bachtiar Nappu
Departemen Teknik Elektro
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
bachtiar@eng.unhas.ac.id

Abstrak-Sejak tahun 1920-an, kestabilan sistem tenaga listrik telah diidentifikasi sebagai persyaratan utama untuk pengoperasian sistem tenaga listrik yang aman dan andal. Ketidakstabilan tegangan dapat membawa seluruh sistem jaringan ke keadaan penurunan tegangan yang signifikan, oleh karena itu tindakan pencegahan diperlukan. Salah satu cara yang ekonomis untuk mencegah jatuh tegangan atau *voltage collapse* adalah pelepasan beban atau *under voltage load shedding* (UVLS), dimana pengurangan beban kecil antara 5% dan 10% dari total beban sistem dapat menjaga kestabilan sistem. Pelepasan beban akibat tegangan rendah atau *under voltage* memegang peranan penting dalam sistem kendali tenaga listrik ketika sistem mengalami gangguan yang besar. Pengurangan beban telah digunakan sejak lama sebagai alternatif terakhir untuk mencegah kegagalan sistem tenaga utama yang diaktifkan oleh relai *under-frequency* atau relai *under-voltage*. Makalah ini mengusulkan metode berdasarkan analisis modal untuk pelepasan beban yang menggunakan *eigenvalue* dan *eigenvector* kemudian menghitung faktor partisipasi bus untuk menentukan lokasi pelepasan beban. Penelitian ini mengkaji keefektifan faktor partisipasi dalam menentukan lokasi pelepasan beban.

Kata Kunci: analisis modal, *eigenvalue*, faktor partisipasi, kestabilan tegangan, pelepasan beban.

I. PENDAHULUAN

Kestabilan sistem tenaga listrik telah diidentifikasi sebagai prasyarat penting untuk pengoperasian sistem tenaga listrik yang aman dan terpercaya selama 100 tahun terakhir. Ketidakstabilan sistem tenaga telah memicu ekspansi gangguan. Selain itu, setelah restrukturisasi sistem tenaga dan penerapan pasar listrik kompetitif, kestabilan tegangan menjadi salah satu perhatian utama dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. Masalah besar dengan kestabilan tegangan terjadi karena besarnya daya yang ditransmisikan jarak jauh. Saat ini, sistem tenaga modern sangat tertekan dan bekerja pada batasnya dengan kapasitas dan margin kestabilan yang lebih kecil. Seiring dengan berkembangnya sistem tenaga ke sistem yang lebih kompleks dan bertekanan tinggi, dengan meningkatnya jumlah interkoneksi, integrasi sumber daya energi terbarukan, sistem transmisi arus searah serta pasar listrik, masalah stabilitas tegangan juga menjadi

lebih penting, karena karakteristik kestabilan sistem menjadi lebih rumit dari sebelumnya [1].

Ketidakstabilan tegangan dapat membawa seluruh sistem jaringan ke kondisi penurunan tegangan yang signifikan, oleh karena itu diperlukan tindakan pencegahan. Referensi [2, 3] membahas berbagai teknik untuk mitigasi ketidakstabilan tegangan, yaitu: penggunaan peralatan kompensasi daya reaktif, pengendalian tegangan jaringan dan keluaran reaktif generator, koordinasi proteksi/kendali, pengendalian *tap-changer* trafo dan pelepasan beban di bawah tegangan. Pelepasan beban merupakan salah satu cara ekonomis untuk mencegah tegangan jatuh ataupun *voltage collapse* di mana pengurangan beban kecil antara 5% dan 10% dari total beban sistem dapat menjaga kestabilan sistem. Meskipun demikian, skema pelepasan beban harus diatur agar dapat membedakan antara gangguan, penurunan tegangan transien dan kondisi tegangan rendah yang menyebabkan ketidakstabilan /runtuhnya tegangan (*voltage collapse*).

Awalnya, konsep *under-voltage load shedding* (UVLS) diusulkan oleh Taylor [4] pada tahun 1992 untuk memberikan proteksi tambahan selain pelepasan beban akibat frekuensi rendah atau *under-frequency load shedding* (UFLS) untuk gangguan abnormal di luar perencanaan dan kriteria operasi. Pedoman dasar untuk desain pelepasan beban tegangan rendah direkomendasikan oleh [5].

Makalah ini merancang skema pelepasan beban (UVLS) dengan menggunakan faktor partisipasi bus dari metode analisis modal. Analisis modal adalah pendekatan analisis kestabilan tegangan statis yang melibatkan teknik perhitungan *eigenvalue* dan *eigenvector* serta telah berhasil diterapkan dalam aplikasi praktis evaluasi kestabilan tegangan. Penelitian ini mempertimbangkan kontinjensi kritis sebagai dasar desain skema UVLS yang diusulkan. Kestabilan tegangan sistem dievaluasi dengan menghitung *eigenvalue*. Kemudian *eigenvector* dihitung untuk menentukan faktor partisipasi modal. Bus yang memiliki faktor partisipasi yang tinggi berarti memiliki kontribusi yang tinggi juga untuk memperbaiki ketidakstabilan sistem. Bus dengan faktor partisipasi yang tinggi menjadi prioritas pertama untuk lokasi pelepasan beban.

II. ANALISIS KESTABILAN TEGANGAN

Kundur, dkk dalam IEE/CIGRE Joint Task Force [6] memberikan definisi dan klasifikasi terbaru dari kestabilan sistem tenaga. Kestabilan tegangan seperti pada [6] didefinisikan sebagai

"kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan tetap pada semua bus dalam sistem setelah mengalami gangguan dari kondisi operasi awal tertentu". Kestabilan tegangan tergantung pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keseimbangan antara permintaan beban dan pasokan beban.

Evaluasi kestabilan tegangan untuk keadaan sistem tertentu memeriksa dua aspek, *proximity* yang memverifikasi seberapa jauh sistem beroperasi dari titik runtuh tegangan dan *mechanism* yang mengidentifikasi area yang rentan terhadap masalah ketidakstabilan tegangan dan memberikan informasi solusi yang berguna untuk mencegah ketidakstabilan [2, 7].

Analisis kestabilan tegangan memegang peran penting untuk memprediksi potensi ketidakstabilan tegangan sistem. Karena sistem tenaga listrik menjadi lebih kompleks dan *stress*, masalah kestabilan tegangan juga menjadi lebih rumit. Selama perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga, masalah tegangan sekarang telah menjadi perhatian utama, karena sejumlah besar kegagalan sistem diyakini disebabkan oleh fenomena ketidakstabilan tegangan. Kestabilan tegangan mencakup berbagai fenomena. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian telah dilakukan untuk menyelidiki fenomena ini. Dengan demikian, pemahaman yang baik tentang sifat fisik kestabilan tegangan serta alat dan teknik untuk analisis kestabilan tegangan telah terlihat [8]. Kestabilan tegangan melibatkan pembangkitan, transmisi dan distribusi dan juga dipengaruhi oleh sistem kendali tegangan, kompensasi dan manajemen daya reaktif, kestabilan sudut-rotor, relai proteksi, dan operasi pusat kendali [9].

Dengan meningkatnya perhatian terhadap ketidakstabilan tegangan, banyak penelitian telah dilakukan untuk mengeksplorasi fenomena ini. Akibatnya, sejumlah teknik yang berarti telah dikembangkan untuk meningkatkan kestabilan tegangan.

III. PELEPASAN BEBAN UNTUK MENINGKATKAN KESTABILAN TEGANGAN SISTEM

Ketika rangkaian insiden ketidakstabilan tegangan mengakibatkan pemadaman (*blackout*) sebagian atau keseluruhan sistem atau tegangan sangat rendah yang berada di bawah batas yang dapat ditoleransi di sebagian besar area sistem, sistem dianggap *collapse*. *Voltage collapse* adalah kondisi sistem tenaga listrik berbeban tinggi yang dapat menyebabkan penurunan tegangan, kegagalan beruntun (*cascading failures*) dan *blackout* [10]. Ketika jaringan transmisi menjadi lebih tertekan, ketidakstabilan tegangan atau risiko *voltage collapse* juga meningkat. Namun, ada dua tindakan yang dapat dilakukan terhadap kejadian yang mungkin memicu ketidakstabilan, karena sistem tenaga menjadi lebih *stress* dan bekerja lebih dekat ke batas margin kestabilannya [11]:

- tindakan preventif untuk mengamati margin keamanan sistem dengan mempertimbangkan kemungkinan kontinjensi yang berbeda

kemudian melakukan tindakan yang tepat untuk mempertahankan margin kestabilan sistem yang memadai.

- tindakan korektif untuk meniadakan risiko yang lebih parah dengan memanfaatkan aplikasi korektif otomatis dengan sistem proteksi.

Penting bagi insinyur sistem tenaga untuk memahami kejadian ini. Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa pelepasan beban (UVLS) adalah tindakan yang efektif untuk mencegah ketidakstabilan tegangan atau *voltage collapse*. Filosofi dari UVLS adalah bahwa setiap kali sistem terganggu kemudian menyebabkan kondisi jatuh tegangan di bawah level tegangan tertentu yang telah dipilih sebelumnya untuk jangka waktu tertentu yang telah ditentukan, maka beban yang dipilih harus dilepaskan dari sistem [12]. Diharapkan tegangan sistem akan kembali ke batas normal dengan melepas beberapa beban. Tujuan dari UVLS adalah untuk mengembalikan keseimbangan daya aktif dalam sistem, untuk mencegah *voltage collapse* dan untuk mengendalikan masalah tegangan yang berada di dalam area lokal daripada membiarkannya menyebar ke area lain [13]. Oleh karena itu, desain UVLS harus bagus. UVLS harus mencakup beban yang cukup serta tidak terlalu sensitif.

IV. METODE

Salah satu faktor penting yang harus diperhitungkan dalam merancang UVLS yang efektif adalah lokasi di mana beban harus dilepaskan. Studi [14] menunjukkan bahwa pelepasan beban di lokasi yang benar dapat mencegah ketidakstabilan tegangan. Namun, melepaskan jumlah beban yang sama di lokasi yang berbeda memberikan hasil yang berbeda dan mungkin tidak efektif untuk meningkatkan kestabilan sistem. Salah satu pendekatan yang mungkin untuk masalah ini adalah dengan menganalisis kestabilan tegangan sistem secara terpisah di mana pelepasan beban terjadi pada setiap bus yang berbeda. Metode ini mungkin cocok untuk sistem daya kecil, namun untuk sistem daya sedang atau bahkan besar, proses ini akan memakan waktu. Faktor partisipasi bus dalam analisis modal, di sisi lain, menawarkan solusi yang efektif untuk masalah ini. Teknik ini memberikan informasi yang berguna tentang area kritis kestabilan tegangan dan informasi tentang langkah terbaik untuk meningkatkan kestabilan tegangan sistem.

Pengenalan bus kritis dilakukan dengan menerapkan metode analisis modal pada sistem matriks Jacobian, oleh karena itu

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \quad (1)$$

Dimana, J_R adalah matriks Jacobian tereduksi. Modus jaringan daya dapat diperoleh dengan *eigenvalue* dan *eigenvector* dari matriks Jacobian J_R , sehingga

$$J_R = \varepsilon \Delta v \quad (2)$$

$$J_R = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \dots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \dots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \dots & \varepsilon_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Di mana,
 ε adalah matriks *eigenvector* kanan dari J_R
 u adalah matriks *eigenvector* kiri dari J_R
 Λ adalah matriks *eigenvalue* diagonal dari J_R

Faktor partisipasi (FP) bus relatif dari k^{th} bus ke i^{th} mode disediakan oleh *eigenvector* kiri dan kanan yang berkorelasi dengan mode kritis sistem dan dapat diberikan sebagai,

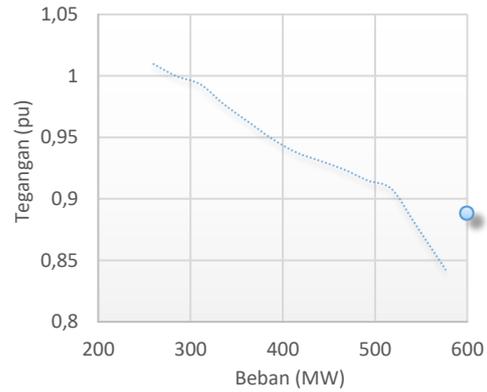
$$FP_{ki} = \varepsilon_{ki} u_{ik} \quad (4)$$

Bus beban dengan faktor partisipasi yang besar memiliki pengaruh yang lebih besar dalam memberikan kontribusi terhadap ketidakstabilan tegangan. Karena itu, bus ini menjadi kandidat bus terbaik untuk menentukan lokasi pelepasan beban untuk meningkatkan kestabilan tegangan sistem.

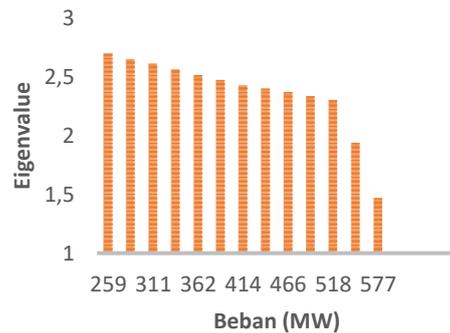
V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem uji IEEE 14-bus [15] digunakan dalam contoh pengujian ini. Dalam desain UVLS ini, terlebih dahulu ditentukan level tegangannya. Level tegangan untuk pelepasan beban harus tepat di atas level yang menandakan timbulnya jatuhnya tegangan. Tingkat tegangan di mana pelepasan dimulai dipilih dengan menghitung tegangan dan *eigenvalue* yang sesuai untuk kondisi yang berbeda dengan meningkatkan tingkat beban dan pembangkitan. Level tegangan ini adalah tegangan pada suatu titik sebelum tegangan jatuh dan *eigenvalue* berubah dengan cepat. Berdasarkan Gambar 1 dan 2, *eigenvalue* menurun dengan cepat setelah di bawah level tegangan 0,908 pu dan *eigenvalue* yang sesuai untuk level tegangan ini adalah 2,3028. Dengan demikian, ini menjadi level tegangan untuk memulai pelepasan beban, karena jika sistem mengalami tegangan lebih rendah dari 0,908 pu, sistem dapat *collapse* tanpa pelepasan beban.

UVLS dirancang dengan mempertimbangkan kontinjensi kritis. Dalam makalah ini, analisis kontinjensi hanya terdiri dari satu gangguan untuk semua saluran transmisi. Tiga kontinjensi mengakibatkan ketidakstabilan. Satu atau beberapa bus tegangan turun di bawah 0,908 pu dan *eigenvalue* di bawah 2,3028.



Gambar 1. Kurva tegangan-daya aktif dari bus IEEE 14



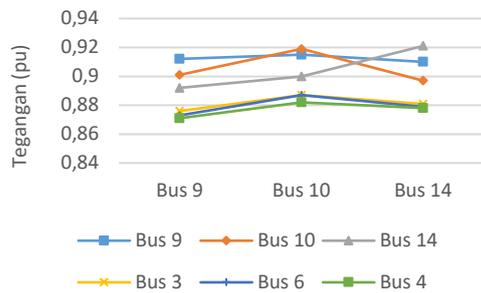
Gambar 2. *Eigenvalue* yang sesuai

A. Gangguan antara Bus 7 dan 9

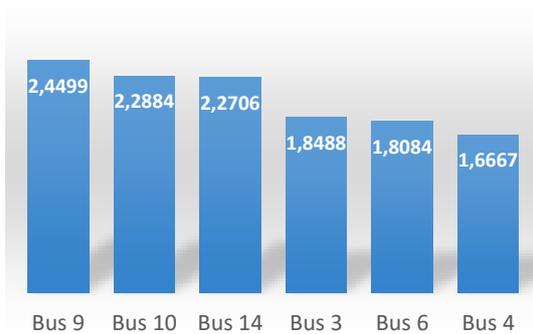
Gangguan antara bus 7 dan 9 mengakibatkan 3 bus tidak stabil, yaitu bus 9 (0,866 pu), bus 10 (0,878 pu), dan bus 14 (0,875 pu). *Eigenvalue* sistem adalah 1,6796. Bus dengan faktor partisipasi tertinggi untuk kondisi ini adalah bus 9 (0,7588). Dengan demikian lokasi pelepasan beban untuk gangguan ini adalah bus 9. Besaran pelepasan beban untuk kondisi ini adalah 14.4 MW + j 9.6 MVar. Dengan pelepasan beban ini, *voltage collapse* dapat dihindari. Semua tegangan bus yang awalnya tidak stabil meningkat, yaitu bus 9 (0,912 pu), bus 10 (0,915 pu) dan bus 14 (0,910 pu). *Eigenvalue* sistem juga meningkat menjadi 2,4499, yang berada di atas batas level *eigenvalue* stabil.

Jumlah pelepasan beban yang sama diterapkan pada bus lain. Bus 10 dan 14 juga memiliki faktor partisipasi yang tinggi. Pelepasan beban dengan jumlah yang sama pada bus-bus ini tidak efektif dalam mencegah ketidakstabilan tegangan. Simulasi pelepasan beban ini dapat meningkatkan level tegangan, tetapi di salah satu bus ini, tegangan masih di bawah batas kestabilan tegangan kritis. Selain itu, pelepasan beban pada bus yang memiliki faktor partisipasi kecil, misalnya bus 3, 4 dan 6, maka pelepasan beban tidak memberikan peningkatan tegangan dan *eigenvalue* sistem yang signifikan. Oleh karena itu, pelepasan beban pada bus dengan faktor partisipasi kecil, tidak akan mencapai tujuan UVLS tersebut di atas. Gambar 3 memperlihatkan profil tegangan untuk bus-bus yang setelah gangguan mengalami ketidakstabilan

untuk pelepasan beban di bus 9, 10, 14, 3, 6, dan 4. Sedangkan Gambar 4 memperlihatkan *eigenvalue* sistem setelah pelepasan beban di bus 9, 10, 14, 3, 6, dan 4.



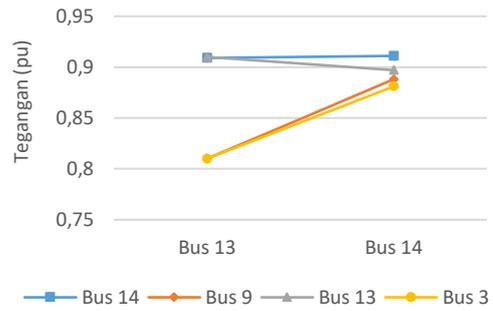
Gambar 3. Profil tegangan di bus 9, 10 dan 14 setelah pelepasan beban di beberapa bus berbeda



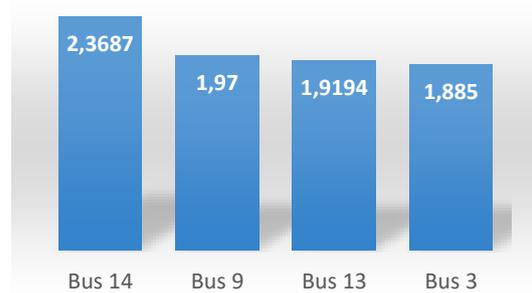
Gambar 4. *Eigenvalue* sistem setelah pelepasan beban di beberapa bus berbeda

B. Gangguan antara bus 13 dan 14

Gangguan berikutnya yang disimulasikan adalah gangguan antara bus 13 dan 14. Bus dengan tegangan rendah untuk gangguan ini adalah bus 13 (0,81 pu) dan 14 (0,88 pu), sedangkan lokasi pelepasan beban adalah bus 14 karena bus 14 memiliki faktor partisipasi tertinggi. *Eigenvalue* sistem adalah 1,8845. Jika kita membandingkan *eigenvalue* dari gangguan ini dan gangguan antara bus 7 dan 9 (1,6796), jumlah pelepasan beban seharusnya lebih kecil karena gangguan ini memiliki *eigenvalue* yang sedikit lebih baik. Jumlah pelepasan beban minimum untuk gangguan ini adalah 8 MW + j 6,4 MVAR. Gambar 5 memperlihatkan profil tegangan untuk bus 13 dan 14 setelah pelepasan beban di bus yang berbeda. Sedangkan Gambar 6 memperlihatkan *eigenvalue* sistem setelah pelepasan beban.

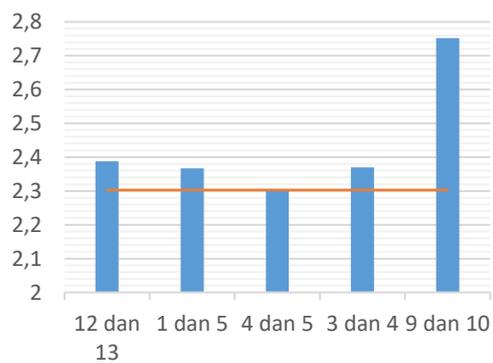


Gambar 5 Peningkatan tegangan di bus 13 dan 14 setelah pelepasan beban di beberapa bus berbeda



Gambar 6. *Eigenvalue* sistem setelah pelepasan beban di beberapa bus berbeda

Untuk gangguan lainnya, sistem masih dalam kondisi tetap stabil. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7, di mana semua *eigenvalue* berada di atas level *eigenvalue* kritis (2,3028) yang menandakan awal terjadinya *voltage collapse*, sehingga tidak diperlukan pelepasan beban.



Gambar 7 *Eigenvalue* untuk berbagai gangguan

VI. KESIMPULAN

Pelepasan beban atau *under-voltage load shedding* (UVLS) yang merupakan cara mudah untuk mencegah *voltage collapse* memainkan peranan penting dalam sistem kendali tenaga listrik ketika sistem mengalami gangguan besar. UVLS telah digunakan untuk waktu yang lama sebagai alternatif terakhir untuk menghindari kegagalan sistem tenaga yang besar.

Dalam makalah ini diusulkan desain UVLS dengan menerapkan pendekatan analisis faktor partisipasi bus. Faktor partisipasi bus menunjukkan

bus beban untuk prioritas pertama untuk lokasi pelepasan beban. Faktor partisipasi telah terbukti efektif di berbagai bidang sistem tenaga listrik. Analisis ini telah menunjukkan pentingnya pelepasan beban di bus yang tepat. Pelepasan beban pada bus dengan faktor partisipasi tinggi dapat memperbaiki kembali kestabilan tegangan sistem dari kondisi ketidakstabilan. Di sisi lain, pelepasan beban dengan jumlah yang sama pada bus yang tidak tepat, dalam hal ini bus dengan faktor partisipasi kecil tidak dapat menghindarkan sistem dari ketidakstabilan, bahkan dapat memperburuk kondisi ketidakstabilan sistem.

REFERENSI

- [1] Z. Shi, W. Yao, Z. Li, L. Zeng, Y. Zhao, R. Zhang, *et al.*, "Artificial intelligence techniques for stability analysis and control in smart grids: Methodologies, applications, challenges and future directions," *Applied Energy*, vol. 278, p. 115733, 2020.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3] Y. Mansour and C. Canizares, "Voltage Stability," in *Power System Stability and Control*, L. L. Grigsby, Ed., ed Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2007.
- [4] C. W. Taylor, "Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, pp. 480-488, 1992.
- [5] H. G. Sarmiento, R. Castellanos, G. Pampin, G. Villa, and M. Mirabal, "Revisiting Undervoltage Load Shedding Schemes: A step by step approach," in *Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, USA, 21-24 April, 2008, pp. 1-6.
- [6] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, *et al.*, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 1387-1401, 2004.
- [7] B. Gao, G. K. Morison, and P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, pp. 1529-1542, 1992.
- [8] P. Kundur, B. Gao, and G. K. Morison, "Practical Application of Modal Analysis for Increasing Voltage Stability Margins," in *Proc. Joint International Power Conference "Athens Power Tech"*, Athens, Greece, 5-8 September, 1993, pp. 222-227.
- [9] Z. Y. Dong, *Power System Dynamics and Stability, reference notes for ME course on Power System Dynamics and Stability*: UQ Publisher, 2007.
- [10] I. Dobson and L. Lu, "Computing an Optimum Direction in Control Space to Avoid Stable Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electric Power Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, pp. 1616-1620, 1992.
- [11] C. Moors, D. Lefebvre, and T. Van Cutsem, "Design of Load Shedding Schemes Against Voltage Instability," in *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Singapore, 23-27 January, 2000, pp. 1495-1500, vol. 2.
- [12] M. Begovic, D. Fulton, M. R. Gonzalez, J. Goossens, E. A. Guro, R. W. Haas, *et al.*, "Summary of "System Protection and Voltage Stability"," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, pp. 631-638, 1995.
- [13] C. J. Mozina, "Undervoltage Load Shedding," in *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers Texas, USA*, 27-29 March, 2007, pp. 16-34.
- [14] C. M. Affonso, L. C. P. da Silva, F. G. M. Lima, and S. Soares, "MW and MVar Management on Supply and Demand Side for Meeting Voltage Stability Margin Criteria," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 19, pp. 1538-1545, 2004.
- [15] Electrical Engineering University of Washington. (1999). *Power System Test Case Archive*.